

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Transformator**

Transformator atau trafo adalah suatu alat listrik yang dapat memindahkan dan mengubah energi listrik dari satu atau lebih rangkaian listrik kerangkaian listrik yang lain melalui suatu gandengan magnet dan berdasarkan prinsip induksi- elektromagnet. Transformator digunakan secara luas, baik dalam bidang tenaga listrik maupun elektronika. Penggunaan transformator dalam sistem tenaga listrik memungkinkan terpilihnya tenaga yang sesuai, dan ekonomis untuk tiap-tiap keperluan misalnya kebutuhan akan tegangan tinggi dalam pendistribusian listrik jarak jauh.

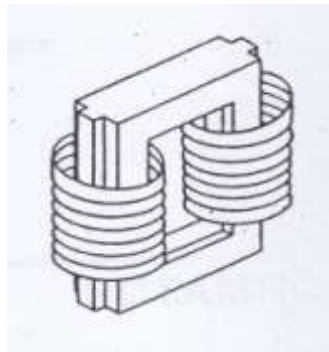
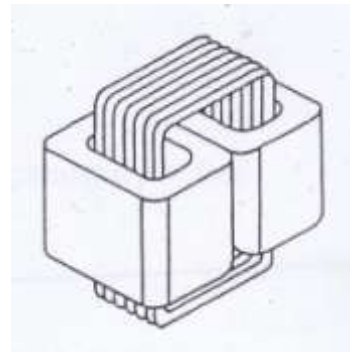
Dalam bidang elektronika, transformator digunakan antara lain sebagai gandengan impedansi antara sumber dan beban ; untuk memisahkan satu rangkaian dari rangkaian yang lain; dan untuk menghambat arus searah sambil tetap melakukan atau mengalirkan arus bolak-balik antara rangkaian. Berdasarkan frekuensi, transformator dapat dikelompokkan sebagai berikut:

1. **Trafo daya** dengan frekuensi kerja 50 Hz
2. **Trafo pendengaran** dengan frekuensi kerja 20Hz – 20 KHz
3. **Trafo MF** dengan frekuensi 455 KHz
4. **Trafo RF** dengan frekuensi > 455KHz

Dalam bidang tenaga listrik pemakaian transformator di kelompokkan menjadi:

1. Transformator Daya
2. Transformator Distribusi
3. Transformator Pengukuran

Kerja transformator yang berdasarkan induksi-elektromagnetik, menghendaki adanya gandengan magnet antara rangkaian primer dan sekunder. Gandengan magnet ini berupa inti besi tempat melakukan fluks bersama. Berdasarkan cara melilitkan kumparan pada inti, dikenal dua macam transformator, yaitu tipe inti dan tipe cangkang.

Gambar 2.1. Tipe Inti<sup>7</sup>Gambar 2.2. Tipe Cangkang<sup>7</sup>

### 2.1.1 Prinsip Kerja Transformator

Prinsip kerja suatu transformator adalah induksi bersama (mutual induction) antara dua rangkaian yang dihubungkan oleh fluks magnet. Dalam bentuk yang sederhana, transformator terdiri dari dua buah kumparan yang secara listrik terpisah tetapi secara magnet dihubungkan oleh suatu alur induksi. Kedua kumparan tersebut mempunyai mutual induction yang tinggi. Jika salah satu kumparan dihubungkan dengan sumber tegangan bolak-balik, fluks bolak-balik timbul di dalam inti besi yang dihubungkan dengan kumparan yang lain menyebabkan atau menimbulkan ggl (gaya gerak listrik) induksi (sesuai dengan induksi elektromagnet) dari hukum Faraday.<sup>7</sup>

### 2.1.2 Hubungan Tiga Fasa Dalam Transformator

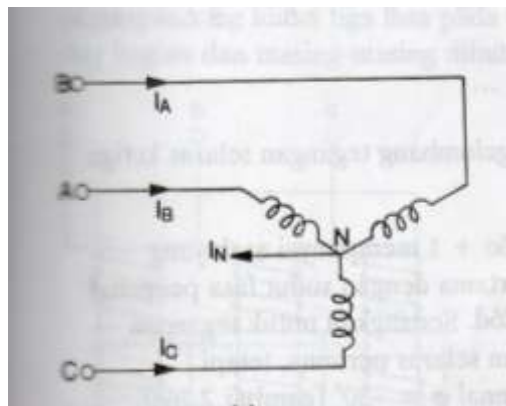
Secara umum hubungan belitan tiga fasa terbagi atas dua jenis, yaitu hubungan wye (Y) dan hubungan delta ( $\Delta$ ). Masing-masing hubungan belitan ini memiliki karakteristik arus dan tegangan yang berbeda-beda, selanjutnya akan dijelaskan dibawah. Baik sisi primer maupun sekunder masing-masing dapat dihubungkan wye ataupun delta. Kedua hubungan ini dapat dijelaskan secara terpisah, yaitu:

<sup>7</sup> Zuhail. 1991. **Dasar Tenaga Listrik**. Bandung : Institut Teknologi Bandung.



**a. Hubungan Wye (Y)**

Hubungan ini dapat dilakukan dengan menggabungkan ketiga belitan transformator yang memiliki rating yang sama, Arus transformator tiga fasa dengan kumparan yang dihubungkan secara bintang yaitu,  $I_A, I_B,$  dan  $I_C$ , masing-masing berbeda fasa  $120^\circ$ .<sup>7</sup>



Gambar 2.3 Hubungan Wye (Y)

Dari gambar 2.3 dapat diketahui sebagai berikut:

$$I_N = I_A + I_B + I_C = 0 \dots\dots\dots (2.7)^7$$

$$V_{AB} + V_{AN} + V_{BN} = V_{AN} - V_{BN} \dots\dots\dots (2.8)^7$$

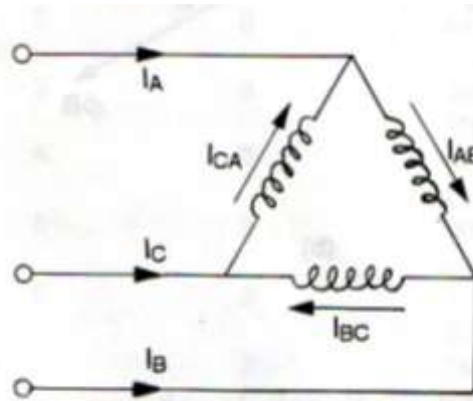
$$V_{BC} = V_{BN} - V_{CN} \dots\dots\dots (2.9)^7$$

$$V_{CA} = V_{CN} - V_{AN} \dots\dots\dots (2.10)^7$$

**b. Hubungan Delta ( $\Delta$ )**

Hubungan delta ini juga mempunyai tiga buah belitan dan masing-masing memiliki rating yang sama, tegangan transformator tiga fasa dengan kumparan yang dihubungkan secara delta, yaitu  $V_{AB}, V_{BC}$  dan  $V_{CA}$ , masing-masing berbeda fasa  $120^\circ$ .<sup>7</sup>

<sup>7</sup> Zuhail. 1991. **Dasar Tenaga Listrik**. Bandung : Institut Teknologi Bandung.

Gambar 2.4 Hubungan Delta ( $\Delta$ )

Dari gambar diatas dapat kita ketahui sebagai berikut:

$$V_{AB} + V_{AB} + V_{CA} = 0 \dots\dots\dots (2.11)^7$$

Untuk beban yang seimbang:

$$I_A = I_{AB} - I_{AC} \dots\dots\dots (2.12)^7$$

$$I_B = I_{BC} - I_{AB} \dots\dots\dots (2.13)^7$$

$$I_C = I_{CA} - I_{AN} \dots\dots\dots (2.14)^7$$

### 2.1.3 Rugi – rugi Transformator

Menurut Drs. Yon Rijono rugi-rugi daya transformator berupa rugi inti atau rugi besi dan rugi tembaga yang terdapat pada kumparan primer maupun sekunder. Untuk mengurangi rugi besi haruslah diambil inti besi yang penampangnya cukup besar agar fluks magnet mudah mengalir di dalamnya. Untuk memperkecil rugi tembaga, harus diambil kawat tembaga yang penampangnya cukup besar untuk mengalirkan arus listrik yang diperlukan. Rugi inti terdiri dari rugi arus eddy dan rugi histerisis. Rugi arus eddy timbul akibat adanya arus pusar pada inti yang menghasilkan panas. Adapun arus pusar inti ditentukan oleh tegangan induksi pada inti yang menghasilkan perubahan-perubahan fluks magnet.<sup>5</sup>

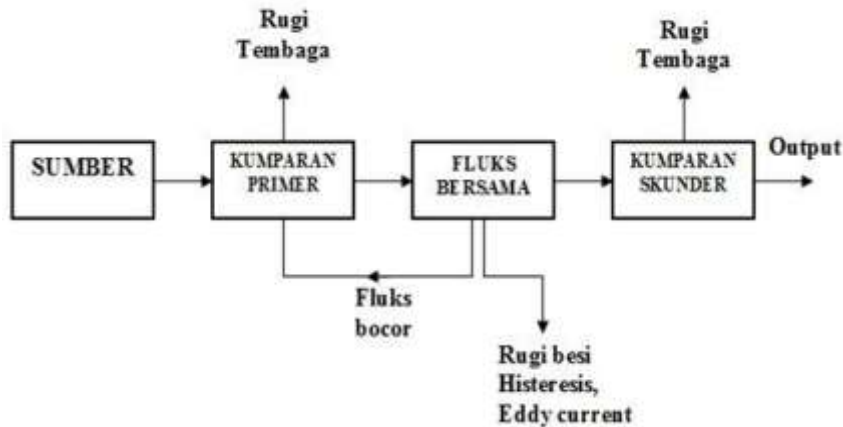
<sup>7</sup> Zuhail. 1991. **Dasar Tenaga Listrik**. Bandung : Institut Teknologi Bandung.

<sup>5</sup> Rijono, Yon. 1997. **Dasar Teknik Tenaga Listrik**. Edisi Revisi. Yogyakarta : Penerbit ANDI Yogyakarta.



Rugi histerisis merupakan rugi tenaga yang disebabkan oleh fluks magnet bolak-balik pada inti.

Gambar di bawah ini adalah diagram rugi-rugi pada transformator:



Gambar 2.5 Diagram Rugi – rugi Transformator<sup>7</sup>

**a. Rugi Tembaga ( $P_{Cu}$ )**

Rugi yang disebabkan arus beban mengalir pada kawat tembaga dapat sebagai:

$$P_{Cu} = I^2 R \dots \dots \dots (2.15)^7$$

Karena arus beban berubah-ubah, rugi tembaga juga tidak konstan bergantung pada beban.

**b. Rugi Besi ( $P_i$ )**

Rugi besi terdiri atas:

- 1) Rugi Histerisis, yaitu rugi yang disebabkan fluks bolak-balik pada inti besi yang dinyatakan sebagai:

$$P_h = K_h \cdot f \cdot B_{maks}^{1.6} \text{ watt} \dots \dots \dots (2.16)^7$$

Keterangan:

$K_h$  = konstanta

$B_{maks}$  = fluks maksimum (weber)

<sup>7</sup> Zuhail. 1991. **Dasar Tenaga Listrik**. Bandung : Institut Teknologi Bandung.



- 2) Rugi arus eddy, yaitu rugi yang disebabkan arus pusar pada inti besi.

Dirumuskan sebagai :

$$P_e = K_e \cdot f^2 \cdot B_{maks}^2 \dots\dots\dots (2.17)^7$$

$$B_M = \frac{\phi_M}{A} \dots\dots\dots (2.18)^7$$

Dimana,

$$\phi_M = \frac{10^8 \cdot (E_{ff})_2}{4,44 \cdot f \cdot N_2} \dots\dots\dots (2.19)^7$$

Dan

$$(E_{ff})_2 = 4,44 \cdot f \cdot N_2 \cdot \phi_M \cdot 10^8 \text{ Volt} \dots\dots\dots (2.20)^7$$

Jadi, rugi besi (rugi inti) adalah:

$$P_i = P_h + P_e \dots\dots\dots (2.21)^7$$

#### 2.1.4 Efisiensi Transformator

Efisiensi dinyatakan sebagai:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{out}}{P_{out} + \sum rugi} = 1 - \frac{\sum rugi}{P_{in}} \times 100\% \dots\dots\dots (2.22)^7$$

Keterangan:

$\eta$  = efisiensi (%)

$P_{out}$  = daya keluar (watt)

$P_{in}$  = daya masuk (watt)

Dimana,

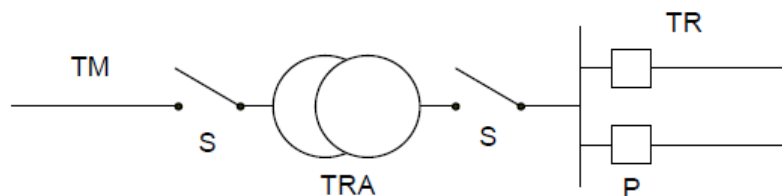
$$\sum rugi = P_{Cu} + P_i \dots\dots\dots (2.23)^7$$

<sup>7</sup> Zuhail. 1991. **Dasar Tenaga Listrik**. Bandung : Institut Teknologi Bandung.



## 2.2 Gardu Distribusi

Sebuah gardu distribusi pada dasarnya merupakan tempat memasang transformator distribusi beserta perlengkapannya. Sebagaimana diketahui, transformator distribusi berfungsi untuk menurunkan tegangan menengah (di Indonesia 20 kV) menjadi tegangan rendah (di Indonesia 220/380V). Dengan demikian transformator distribusi merupakan suatu penghubung antara jaringan tegangan menengah dan jaringan tegangan rendah. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa di dalam sebuah gardu distribusi akan “masuk” saluran tegangan menengah dan “keluar” saluran tegangan rendah.<sup>4</sup>



Gambar 2.6 Skema Gardu Distribusi<sup>4</sup>

Keterangan:

TRA = Transformator Distribusi

P = Proteksi

S = Saklar atau Pemisah

TM = Tegangan Menengah

TR = Tegangan Rendah

Kabel tegangan menengah memasuki gardu dan melalui sebuah saklar atau pemisah dihubungkan pada transformator. Saklar atau pemisah pada sisi tegangan rendah sering tidak terpasang dan langsung disambungkan pada proteksi yang berupa sekering.

<sup>4</sup> Kadir, Abdul. 1998. **Distribusi Dan Utilitas Tenaga Listrik**. Jakarta: Universitas Indonesia.



### 2.3 Transformator Distribusi

Transformator merupakan alat yang memegang peran penting dalam sistem distribusi. Transformator distribusi mengubah tegangan menengah menjadi tegangan rendah. Sebagaimana halnya dengan komponen-komponen lainnya, lain dari rangkaian distribusi, rugi-rugi energi dan turun tegangan yang disebabkan arus listrik yang mengalir menuju beban merupakan penentuan untuk pemilihan dan lokasi transformator, transformator distribusi yang umum digunakan adalah transformator step- down 20KV/400V. Tegangan fasa ke fasa sistem jaringan tegangan rendah adalah 380 V.<sup>4</sup>

### 2.4 Rugi Akibat Adanya Arus Pada Penghantar Netral Transformator

Sebagai akibat dari beban yang tidak seimbang tiap-tiap fasa pada sisi sekunder transformator (fasa R, S, dan T) mengalirlah arus di penghantar netral transformator. Arus yang mengalir pada penghantar netral transformator ini menyebabkan rugi-rugi. Untuk menghitung rugi-rugi pada penghantar netral dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$P_N = I_N^2 \cdot R_N \dots \dots \dots (2.25)^3$$

Dimana,

$P_N$  = rugi rugi pada penghantar netral transformator (watt)

$I_N$  = arus pada penghantar netral (A)

$R_N$  = tahanan penghantar netral

<sup>4</sup> Kadir, Abdul. 1998. **Distribusi Dan Utilitas Tenaga Listrik**. Jakarta: Universitas Indonesia.

<sup>3</sup> Endi Sopyandi-2012 **Pengaruh Ketidakseimbangan Pembebanan Beban Pada Trafo Distribusi**





## 2.5 Perhitungan Pembebanan Trafo Distribusi Sebelum Pemerataan Beban dan Persentase Pembebanan 1 Fasa

### a. Pembebanan Fasa R

$$\% \text{Pembebanan} = \frac{I_R \times V_R}{\left(\frac{\text{Kapasitas Trafo}}{3}\right)} \times 100\% \dots \dots \dots (2.26)^6$$

### b. Persentase Pembebanan 3 Fasa

$$\% \text{Pembebanan} = \frac{(I_R \times V_R) + (I_S \times V_S) + (I_T \times V_T)}{\text{Kapasitas Trafo}} \times 100\% \dots \dots \dots (2.27)^6$$

## 2.6 Ketidakseimbangan Beban

Yang dimaksud dengan keadaan seimbang adalah suatu keadaan dimana :

1. Ketiga vektor arus atau tegangan sama besar
2. Ketiga vektor saling membentuk sudut  $120^\circ$  satu sama lain.

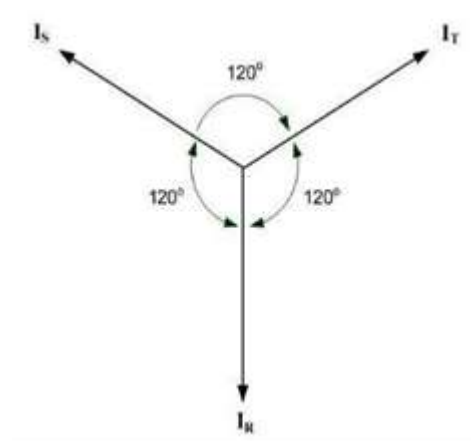
Sedangkan yang dimaksud dengan keadaan tidak seimbang adalah keadaan dimana salah satu atau kedua syarat keadaan tidak seimbang tidak terpenuhi.

Kemungkinan keadaan tidak seimbang ada 3, yaitu :

1. Ketiga vektor sama besar, tetapi tidak membentuk sudut  $120^\circ$  satu sama lain.
2. Ketiga vektor tidak sama besar, tetapi membentuk membentuk sudut  $120^\circ$  satu sama lain.
3. Ketiga vektor tidak sama besar dan tetapi tidak membentuk sudut  $120^\circ$  satu sama lain.

<sup>6</sup> Yoakim Simamora, Panusur S.M.L. Tobing. Analisis Ketidakseimbangan Beban Transformator Distribusi Untuk Identifikasi Beban Lebih Dan Estimasi Rugi-Rugi Pada Jaringan Tegangan Rendah

Untuk lebih jelasnya dapat digambarkan dengan vektor diagram arus pada gambar 2.7.



Gambar 2.7 Vektor Diagram Arus Dalam Keadaan Seimbang<sup>2</sup>

Gambar 2.7 menunjukkan diagram vektor arus dalam keadaan seimbang. Disini terlihat bahwa penjumlahan ketiga vektor arusnya ( $I_R$ ,  $I_S$ ,  $I_T$ ) adalah sama dengan nol sehingga tidak muncul arus netral ( $I_N$ ).

Dimana arus yang berlaku pada hubungan Y tersebut:

$$I_A = \frac{V \angle 0^\circ}{Z \angle \theta} = I \angle -\theta \dots\dots\dots (2.28)^1$$

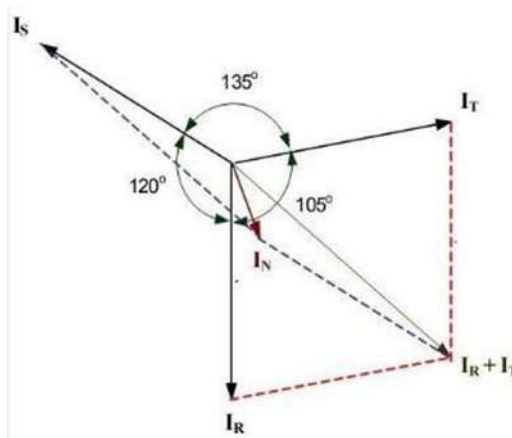
$$I_B = \frac{V \angle -120^\circ}{Z \angle \theta} = I \angle -120^\circ - \theta \dots\dots\dots (2.29)^1$$

$$I_C = \frac{V \angle -240^\circ}{Z \angle \theta} = I \angle -240^\circ - \theta \dots\dots\dots (2.30)^1$$

<sup>1</sup> Ambiya, Nurul. 2013. **Analisa Pemerataan Beban Untuk Meningkatkan Efisiensi Kerja Transformator Pada Gardu Distribusi U. 254**. Tidak Diterbitkan.

<sup>2</sup> Badaruddin. 2012. **Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus Netral Dan Losses Pada Trafo Distribusi Proyek Rusunami Gading Icon**

$$\begin{aligned}
 I_N &= I_A + I_B + I_C \dots \dots \dots (2.31)^1 \\
 &= I \angle -\theta + I \angle -120^\circ - \theta + I \angle -240^\circ - \theta \\
 &= I \cos(-\theta) + jI \sin(-\theta) + I \cos(-\theta - 120^\circ) + jI \sin(-\theta - 120^\circ) + I \cos(-\theta - 240^\circ) + jI \sin(-\theta - 240^\circ) \\
 &= I [\cos(-\theta) + \cos(-\theta - 120^\circ) + I \cos(-\theta - 240^\circ)] + jI [\sin(-\theta) + \sin(-\theta - 120^\circ) + \sin(-\theta - 240^\circ)]
 \end{aligned}$$



Gambar 2.8 Vektor Diagram Arus Dalam Keadaan Tidak Seimbang<sup>2</sup>

Sedangkan pada gambar 2.8 menunjukkan vektor diagram arus yang tidak seimbang. Disini terlihat bahwa penjumlahan ketiga vektor arusnya ( $I_R, I_S, I_T$ ) tidak sama dengan nol sehingga muncul sebuah besaran yaitu arus netral ( $I_N$ ) yang besarnya bergantung dari seberapa besar faktor ketidakseimbangannya.

<sup>1</sup> Ambiya, Nurul. 2013. **Analisa Pemerataan Beban Untuk Meningkatkan Efisiensi Kerja Transformator Pada Gardu Distribusi U. 254**. Tidak Diterbitkan.

<sup>2</sup> Badaruddin. 2012. **Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Terhadap Arus Netral Dan Losses Pada Trafo Distribusi Proyek Rusunami Gading Icon**



## 2.7 Perhitungan Ketidakseimbangan Beban

$$I_{rata-rata} = \frac{I_R + I_S + I_T}{3} \dots\dots\dots (2.32)^7$$

Dimana besarnya arus fasa dalam keadaan seimbang (I) sama dengan besarnya arus rata-rata, maka koefisien a, b dan c diperoleh dengan :

$$a = \frac{I_R}{I_{rata-rata}} \dots\dots\dots (2.33)^6$$

$$b = \frac{I_S}{I_{rata-rata}} \dots\dots\dots (2.34)^6$$

$$c = \frac{I_T}{I_{rata-rata}} \dots\dots\dots (2.34)^6$$

Pada keadaan seimbang, besarnya koefisien a, b dan c adalah 1. Dengan demikian rata-rata ketidakseimbangan (dalam %) adalah :

$$\%ketidakseimbangan = \frac{(|a-1| + |b-1| + |c-1|)}{3} \times 100\% \dots\dots\dots (2.35)^6$$

---

<sup>6</sup> Yoakim Simamora, Panusur S.M.L. Tobing. **Analisis Ketidakseimbangan Beban Transformator Distribusi Untuk Identifikasi Beban Lebih Dan Estimasi Rugi-Rugi Pada Jaringan Tegangan Rendah**